Homework

Basic:

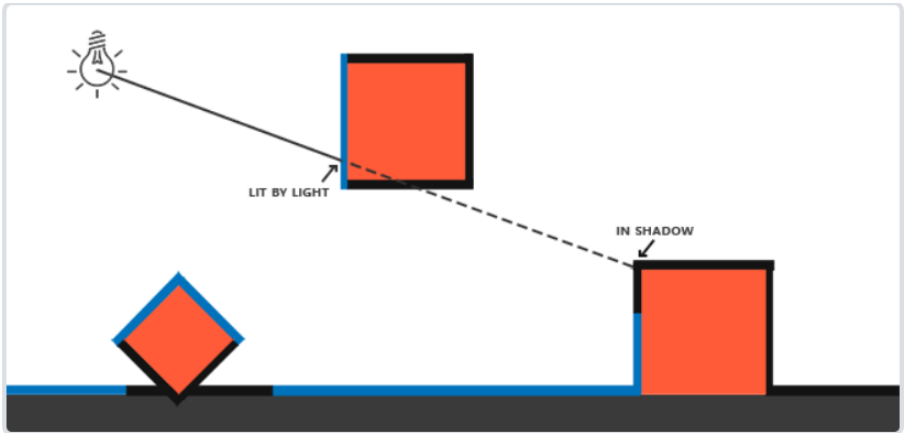
1. 实现方向光源的Shadowing Mapping:
    - 要求场景中至少有一个object和一块平面(用于显示shadow)
    - 光源的投影方式任选其一即可
    - 在报告里结合代码，解释Shadowing Mapping算法
2. 修改GUI

Bonus:

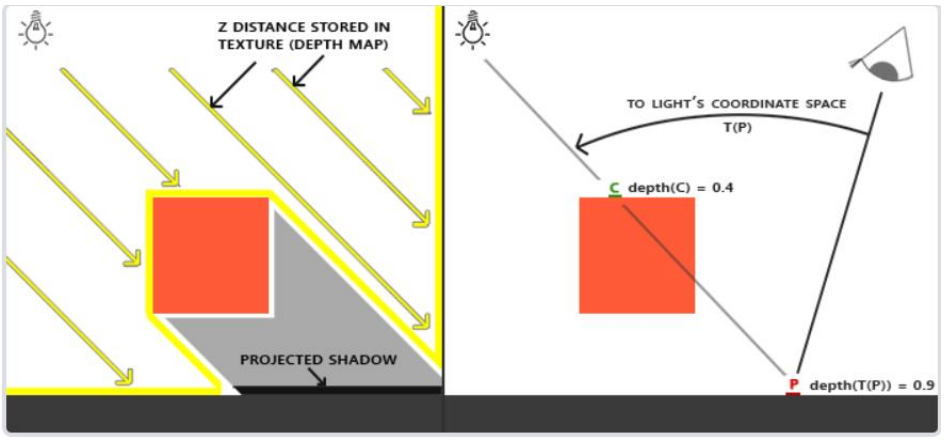
1. 实现光源在正交/透视两种投影下的Shadowing Mapping
2. 优化Shadowing Mapping (可结合References链接，或其他方法。优化方式越多越好，在报告里说明，有加分)

1. 实现 **Shadow mapping**

首先，我们要在**光源**的角度进行渲染，得到光源位置的**深度贴图**的信息，其中深度贴图中的每一个像素点代表从光源位置看去，能看到的**最近的物体**的深度。也就是说在进行正式的渲染之前，要**先**进行一遍**渲染**，生成从光源位置的深度贴图。这里渲染得到的数据保存在我们自己创建的**深度缓冲**中。



接下来进行**正式的渲染**，即对屏幕坐标中的每一点的**颜色缓冲**进行填充。这次渲染的观察点是下图所示的**人眼**所在的位置。比如当前要渲染点 **P**，在进行 **shadow mapping** 时，我们要决定 **P** 点**是否在阴影中**，首先我们要将 **P** 点转换到**光空间**中，即从光源看向 **P** 点的坐标，然后将深度缓冲中该坐标的**深度值**与 **P** 点的 **z 坐标**进行比较，如果 **P** 点处于光源能看见的**最近点**的**后面**，则 **P** 点在阴影中，否则不在阴影中。



实现：

首先我们要生成保存**深度信息**的**帧缓冲 depthMapFBO**，调用函数**glGenFramebuffers**即可生成**帧缓冲**。

接下来创建**2D纹理**，提供给帧缓冲使用。因为我们只关心深度值，我们要把纹理格式指定为**GL_DEPTH_COMPONENT**。我们还要把纹理的高宽设置为1024：这是深度贴图的解析度。

帧缓冲和纹理都生成成功之后就可以调用 **glFramebufferTexture2D** 函数将生成的纹理与深度贴图的缓冲绑定起来，这里的参数 **GL_DEPTH_ATTACHMENT** 即表示该纹理用于存储图像的**深度信息**。

由于这里还不需要读写颜色缓冲区的数据，所以调用函数**glDrawBuffer(GL_NONE)**和**glReadBuffer(GL_NONE)**即可。

```
const GLuint SHADOW_WIDTH = 1024, SHADOW_HEIGHT = 1024;
    GLuint depthMapFBO;
    glGenFramebuffers(1, &depthMapFBO);

    GLuint depthMap;
    glGenTextures(1, &depthMap);
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, depthMap);

    glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_DEPTH_COMPONENT,
SHADOW_WIDTH, SHADOW_HEIGHT, 0, GL_DEPTH_COMPONENT, GL_FLOAT,
NULL);
    glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER,
GL_NEAREST);
    glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER,
GL_NEAREST);
    glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S,
GL_CLAMP_TO_BORDER);
    glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T,
GL_CLAMP_TO_BORDER);
    GLfloat borderColor[] = { 1.0, 1.0, 1.0, 1.0 };
    glTexParameterfv(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_BORDER_COLOR,
borderColor);

    glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, depthMapFBO);
    glFramebufferTexture2D(GL_FRAMEBUFFER, GL_DEPTH_ATTACHMENT,
GL_TEXTURE_2D, depthMap, 0);
    glDrawBuffer(GL_NONE);
    glReadBuffer(GL_NONE);
    glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0);
```

接下来便可以渲染**深度贴图**了。首先我们看一下生成深度贴图所用的着色器。
顶点着色器 **ShadowMappingShader.v**

position 依旧代表顶点的位置
lightSpaceMatrix 代表将坐标转换成光空间的 **view** 与 **projection** 矩阵想乘。
model 矩阵即模型矩阵
这里顶点着色器的作用就是将顶点转换到**光空间**。

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 position;

uniform mat4 lightSpaceMatrix;
uniform mat4 model;

void main()
{
    gl_Position = lightSpaceMatrix * model * vec4(position, 1.0f);
}
```

片段着色器 **ShadowMappingShader.f**
这里的片段着色器什么都不做，运行完后，**深度缓冲**会被更新，底层会**默认**去设置深度缓冲。

```
#version 330 core

void main()
{
}
```

主函数中进行深度缓冲渲染：

```
Shader depthShader("ShadowMappingDepth.v",
"ShadowMappingDepth.f");
bindVAO();

float nearPlane = 1.0f;
float farPlane = 7.5f;

int display_w = 1024;
int display_h = 1024;


float left = -10;
float right = 10;
float bottom = -10;
float top = 10;
```

```
while (!glfwWindowShouldClose(window))
{
    ...
    glm::mat4 lightProjection, lightView;
    glm::mat4 lightSpaceMatrix;
    lightProjection = glm::ortho(left, right, bottom, top,
    nearPlane, farPlane);
    lightView = glm::lookAt(lightPos, glm::vec3(0.0f),
    glm::vec3(0.0, 1.0, 0.0));
    lightSpaceMatrix = lightProjection * lightView;

    depthShader.useProgram();
    depthShader.setMatrix("lightSpaceMatrix", lightSpaceMatrix);

    glViewport(0, 0, SHADOW_WIDTH, SHADOW_HEIGHT);
    glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, depthMapFBO);
    glClear(GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
    renderScene(depthShader);
    glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0);
    ...
}
```

其中 **bindVAO** 用来对所用 **VAO** 进行绑定。这里主要有三个 **VAO**
分别是**平面**对应的 VAO、**立方体**的 VAO 和用来**调试深度缓冲的矩形**的 VAO。

```
glm::vec3 lightPos(-2.0f, 4.0f, -1.0f);
GLuint cubeVAO;
GLuint planeVAO;
GLuint quadVAO = 0;
void bindVAO() {
    float vertices[] = {
        -0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
        0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
        0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
        0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
        -0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
        -0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,

        -0.5f, -0.5f,  0.5f,  0.0f,  0.0f,  1.0f,
        0.5f, -0.5f,  0.5f,  0.0f,  0.0f,  1.0f,
        0.5f,  0.5f,  0.5f,  0.0f,  0.0f,  1.0f,
        0.5f,  0.5f,  0.5f,  0.0f,  0.0f,  1.0f,
        -0.5f,  0.5f,  0.5f,  0.0f,  0.0f,  1.0f,
        -0.5f, -0.5f,  0.5f,  0.0f,  0.0f,  1.0f,
```

```
    -0.5f,  0.5f,  0.5f, -1.0f,  0.0f,  0.0f,
    -0.5f,  0.5f, -0.5f, -1.0f,  0.0f,  0.0f,
    -0.5f, -0.5f, -0.5f, -1.0f,  0.0f,  0.0f,
    -0.5f, -0.5f, -0.5f, -1.0f,  0.0f,  0.0f,
    -0.5f, -0.5f,  0.5f, -1.0f,  0.0f,  0.0f,
    -0.5f,  0.5f,  0.5f, -1.0f,  0.0f,  0.0f,

    0.5f,  0.5f,  0.5f,  1.0f,  0.0f,  0.0f,
    0.5f,  0.5f, -0.5f,  1.0f,  0.0f,  0.0f,
    0.5f, -0.5f, -0.5f,  1.0f,  0.0f,  0.0f,
    0.5f, -0.5f, -0.5f,  1.0f,  0.0f,  0.0f,
    0.5f, -0.5f,  0.5f,  1.0f,  0.0f,  0.0f,
    0.5f,  0.5f,  0.5f,  1.0f,  0.0f,  0.0f,

     -0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, -1.0f,  0.0f,
    0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, -1.0f,  0.0f,
    0.5f, -0.5f,  0.5f,  0.0f, -1.0f,  0.0f,
    0.5f, -0.5f,  0.5f,  0.0f, -1.0f,  0.0f,
    -0.5f, -0.5f,  0.5f,  0.0f, -1.0f,  0.0f,
    -0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, -1.0f,  0.0f,

    -0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f,  1.0f,  0.0f,
    0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f,  1.0f,  0.0f,
    0.5f,  0.5f,  0.5f,  0.0f,  1.0f,  0.0f,
    0.5f,  0.5f,  0.5f,  0.0f,  1.0f,  0.0f,
    -0.5f,  0.5f,  0.5f,  0.0f,  1.0f,  0.0f,
    -0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f,  1.0f,  0.0f
};

unsigned int VBO;
glGenVertexArrays(1, &cubeVAO);
glGenBuffers(1, &VBO);
glBindVertexArray(cubeVAO);
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, VBO);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertices), vertices,
GL_STATIC_DRAW);

glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 *
sizeof(float), (void*)0);
glEnableVertexAttribArray(1);
glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 *
sizeof(float), (void*)(3 * sizeof(float)));
```

```
    //glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, 0);
    glBindVertexArray(0);

     GLfloat planeVertices[] = {
          // Positions          // Normals
         25.0f, -0.5f, 25.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f,
          -25.0f, -0.5f, -25.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f,
        -25.0f, -0.5f, 25.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f,

         25.0f, -0.5f, 25.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f,
        25.0f, -0.5f, -25.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f,
        -25.0f, -0.5f, -25.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f
    };

    GLuint planeVBO;
    glGenVertexArrays(1, &planeVAO);
    glGenBuffers(1, &planeVBO);
    glBindVertexArray(planeVAO);
    glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, planeVBO);
    glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(planeVertices),
    &planeVertices, GL_STATIC_DRAW);
    glEnableVertexAttribArray(0);
    glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 *
    sizeof(GLfloat), (GLvoid*)0);
    glEnableVertexAttribArray(1);
    glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 *
    sizeof(GLfloat), (GLvoid*)(3 * sizeof(GLfloat)));
    glBindVertexArray(0);
}
```

renderScene 函数用来渲染场景中的物体，这里包括**一个平面**和平面**上方**的**一个立方体**。并且在调用此函数**渲染物体之前**，要调用
`glViewport(0, 0, SHADOW_WIDTH, SHADOW_HEIGHT)`设置深度缓冲的**分辨率**
`glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, depthMapFBO)`**绑定**深度缓冲
`glClear(GL_DEPTH_BUFFER_BIT)`**清空**深度缓冲。

```
void renderScene(Shader &shader)
{
    // Floor
    glm::mat4 model(1.0);
    shader.setModel(model);
    glBindVertexArray(planeVAO);
    glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 6);
    glBindVertexArray(0);
```

```
    // Cubes
    model = glm::mat4(1.0);
    model = glm::translate(model, glm::vec3(0.0f, 1.5f, 0.0));
    shader.setModel(model);

       // Render Cube
    glBindVertexArray(cubeVAO);
    glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 36);
    glBindVertexArray(0);
}
```

接下来就可以对场景中的物体进行 Shadow mapping 了，依然先看**着色器**

顶点着色器 ShaowMapping.v
这里与之前 Phong 光照模型不太相同的地方是多了个 **FragPosLightSpace** 变量，我们用同一个 lightSpaceMatrix，把**世界空间**顶点位置转换为**光空间**。顶点着色器传递一个普通的经变换的世界空间顶点位置 vs_out.FragPos 和一个光空间的 vs_out.FragPosLightSpace 给像素着色器。

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 position;
layout (location = 1) in vec3 normal;

out VS_OUT {
    vec3 FragPos;
    vec3 Normal;
    vec4 FragPosLightSpace;
} vs_out;

uniform mat4 projection;
uniform mat4 view;
uniform mat4 model;
uniform mat4 lightSpaceMatrix;

void main()
{
    gl_Position = projection * view * model * vec4(position,
1.0f);
    vs_out.FragPos = vec3(model * vec4(position, 1.0));
    vs_out.Normal = transpose(inverse(mat3(model))) * normal;
    vs_out.FragPosLightSpace = lightSpaceMatrix *
vec4(vs_out.FragPos, 1.0);
}
```

ShadowMapping.f

片段着色器使用 **Phong** 光照模型渲染场景。我们接着计算出一个 **shadow** 值，当 fragment 在阴影中时是 1.0，在阴影外是 0.0。然后，**diffuse** 和 **specular** 颜色会乘以这个阴影元素。由于阴影不会是全黑的（由于散射），我们把 ambient 分量从乘法中剔除。我们声明一个 **shadowCalculation** 函数，用它计算阴影。像素着色器的最后，我们我们把 **diffuse** 和 **specular** 乘以**(1-阴影元素)**，这表示这个片元有**多大成分不在阴影中**。这个像素着色器还需要两个额外输入，一个是**光空间的片元位置**和第一个渲染阶段得到的**深度贴图**。

这里已经包含了对于阴影的一些**优化。**

```
#version 330 core
out vec4 FragColor;

in VS_OUT {
    vec3 FragPos;
    vec3 Normal;
    vec4 FragPosLightSpace;
} fs_in;

uniform sampler2D shadowMap;

uniform vec3 lightPos;
uniform vec3 viewPos;

uniform bool shadows = true;

float ShadowCalculation(vec4 fragPosLightSpace)
{
    vec3 projCoords = fragPosLightSpace.xyz / fragPosLightSpace.w;
    projCoords = projCoords * 0.5 + 0.5;
    float closestDepth = texture(shadowMap, projCoords.xy).r;
    float currentDepth = projCoords.z;

    vec3 normal = normalize(fs_in.Normal);
    vec3 lightDir = normalize(lightPos - fs_in.FragPos);
    float bias = max(0.05 * (1.0 - dot(normal, lightDir)), 0.005);

    float shadow = 0.0;
    vec2 texelSize = 1.0 / textureSize(shadowMap, 0);
    for(int x = -1; x <= 1; ++x)
    {
        for(int y = -1; y <= 1; ++y)
        {
            float pcfDepth = texture(shadowMap, projCoords.xy +
            vec2(x, y) * texelSize).r;
```

```
                shadow += currentDepth - bias > pcfDepth  ? 1.0 :
                0.0;
            }
        }
        shadow /= 9.0;

        if(projCoords.z > 1.0)
        shadow = 0.0;

        return shadow;
}

void main()
{
    vec3 color = vec3(0.0f, 0.8f, 0.0f);
    vec3 normal = normalize(fs_in.Normal);
    vec3 lightColor = vec3(0.4);
    // Ambient
    vec3 ambient = 0.2 * color;
    // Diffuse
    vec3 lightDir = normalize(lightPos - fs_in.FragPos);
    float diff = max(dot(lightDir, normal), 0.0);
    vec3 diffuse = diff * lightColor;
    // Specular
    vec3 viewDir = normalize(viewPos - fs_in.FragPos);
    float spec = 0.0;
    vec3 halfwayDir = normalize(lightDir + viewDir);
    spec = pow(max(dot(normal, halfwayDir), 0.0), 64.0);
    vec3 specular = spec * lightColor;

    float shadow = shadows ?
ShadowCalculation(fs_in.FragPosLightSpace) : 0.0;
    shadow = min(shadow, 0.75);
    vec3 lighting = (ambient + (1.0 - shadow) * (diffuse +
specular)) * color;

    FragColor = vec4(lighting, 1.0f);
}
```

首先要检查一个片元是否在阴影中，把光空间片元位置转换为裁切空间的标准化设备坐标。当我们在顶点着色器输出一个裁切空间顶点位置到 **gl_Position** 时，**OpenGL 自动**进行一个透视除法，将裁切空间坐标的范围**-w** 到 **w** 转为**-1** 到 **1**，这要将 **x**、**y**、**z** 元素除以向量的 w 元素来实现。由于裁切空间的 **FragPosLightSpace** 并不会通过 **gl_Position** 传到像素着色器里，我们必须**自己做**透视除法：

因为来自深度贴图的深度在 0 到 1 的范围，我们也打算使用 **projCoords** 从深度贴图中去采样，所以我们将 **NDC 坐标**变换为 0 到 1 的范围：

有了这些投影坐标，我们就能从深度贴图中采样得到 0 到 1 的结果，从第一个渲染阶段的 projCoords 坐标直接对应于变换过的 NDC 坐标。我们将得到光的位置视野下最近的深度：

为了得到片元的当前深度，我们简单获取投影向量的 z 坐标，它等于来自光的透视视角的片元的深度。

改进：

1） 阴影失真：

因为阴影贴图受限于解析度，在距离光源比较远的情况下，多个片元可能从深度贴图的同一个值中去采样。图片每个斜坡代表深度贴图一个单独的纹理像素。你可以看到，多个片元从同一个深度值进行采样。

虽然很多时候没问题，但是当光源以一个角度朝向表面的时候就会出问题，这种情况下深度贴图也是从一个角度下进行渲染的。多个片元就会从同一个斜坡的深度纹理像素中采样，有些在地板上面，有些在地板下面；这样我们所得到的阴影就有了差异。因为这个，有些片元被认为是在阴影之中，有些不在，由此产生了图片中的条纹样式。

我们可以用一个叫做**阴影偏移**（shadow bias）的技巧来解决这个问题，我们简单的对表面的深度（或深度贴图）应用一个偏移量，这样片元就不会被错误地认为在表面之下了。

使用了偏移量后，所有采样点都获得了比表面深度更小的深度值，这样整个表面就正确地被照亮，没有任何阴影。我们可以这样实现这个偏移：

2） 悬浮

这个阴影失真叫做悬浮(Peter Panning)，因为物体看起来轻轻悬浮在表面之上（译注 Peter Pan 就是童话彼得潘，而 panning 有平移、悬浮之意，而且彼得潘是个会飞的男孩…）。我们可以使用一个叫技巧解决大部分的 Peter panning 问题：当渲染深度贴图时候使用正面剔除（front face culling）你也许记得在面剔除教程中 OpenGL 默认是背面剔除。我们要告诉 OpenGL 我们要剔除正面。

因为我们只需要深度贴图的深度值，对于实体物体无论我们用它们的正面还是背面都没问题。使用背面深度不会有错误，因为阴影在物体内部有错误我们也看不见。

为了修复 peter 游移，我们要进行正面剔除，先必须开启 **GL_CULL_FACE**：

```
glCullFace(GL_FRONT);
renderScene(depthShader);
```

```
glCullFace(GL_BACK);
```

3） PCF

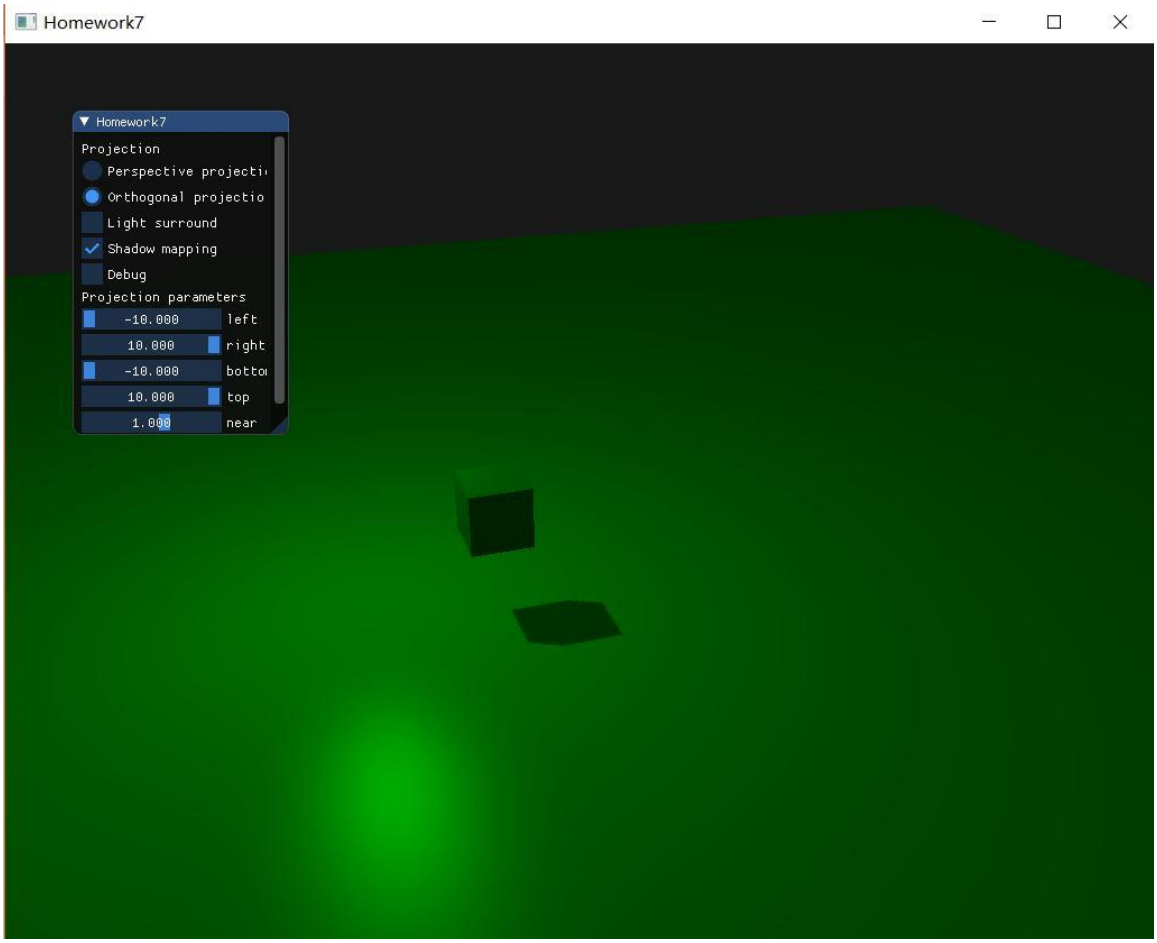
因为深度贴图有一个固定的解析度，多个片元对应于一个纹理像素。结果就是多个片元会从深度贴图的同一个深度值进行采样，这几个片元便得到的是同一个阴影，这就会产生锯齿边。

你可以通过增加深度贴图解析度的方式来降低锯齿块，也可以尝试尽可能的让光的视锥接近场景。

另一个（并不完整的）解决方案叫做 PCF（percentage-closer filtering），这是一种多个不同过滤方式的组合，它产生柔和阴影，使它们出现更少的锯齿块和硬边。核心思想是从深度贴图中多次采样，每一次采样的纹理坐标都稍有不同。每个独立的样本可能在也可能不再阴影中。所有的次生结果接着结合在一起，进行平均化，我们就得到了柔和阴影。

一个简单的 PCF 的实现是简单的从纹理像素四周对深度贴图采样，然后把结果平均起来：

效果：这里实现的是正交投影：



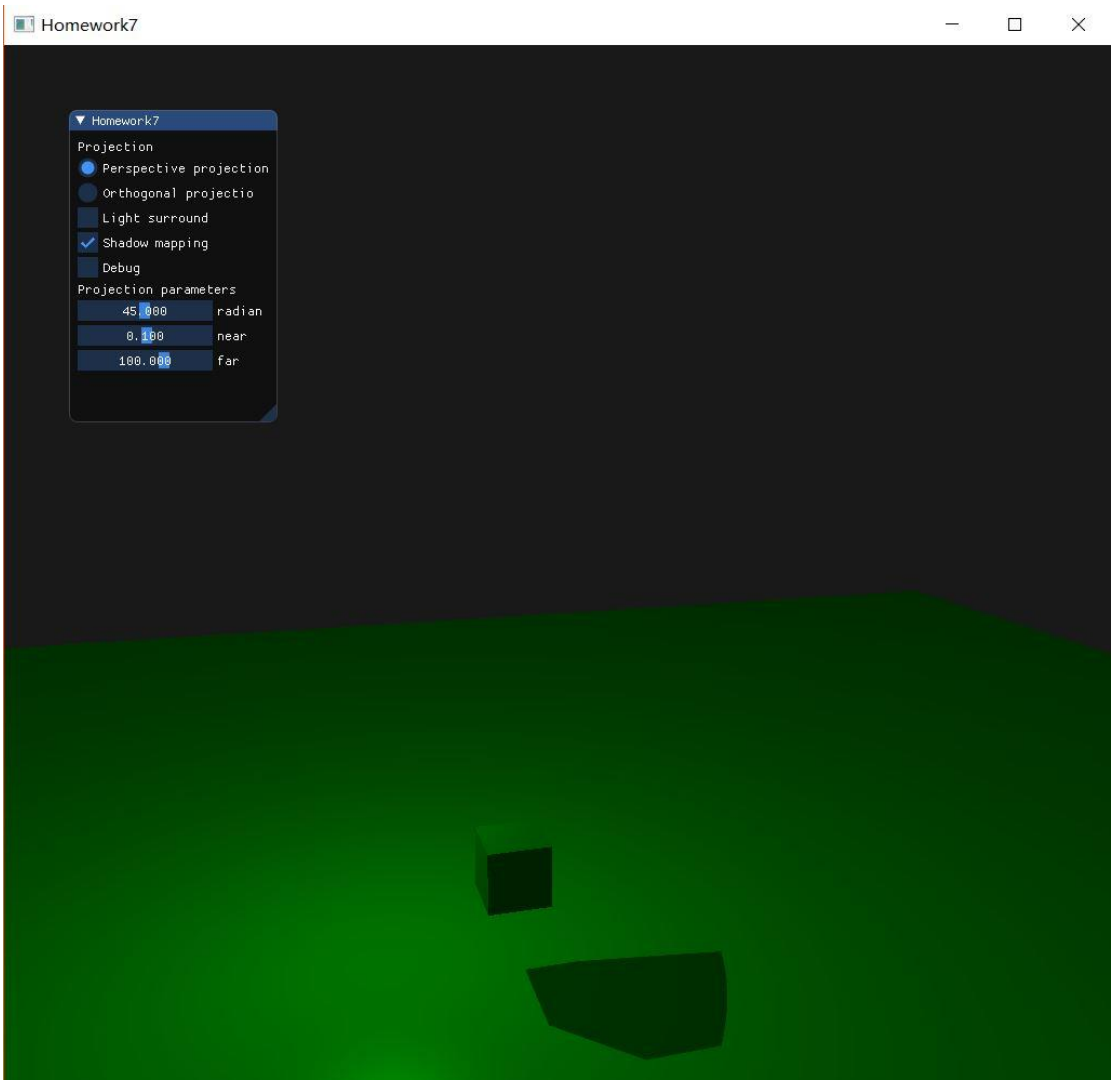
2. 实现光源的不同**投影**方式

GUI 中加入选项，并可调节投影的参数，具体做法与之前实现投影的作业无区别。

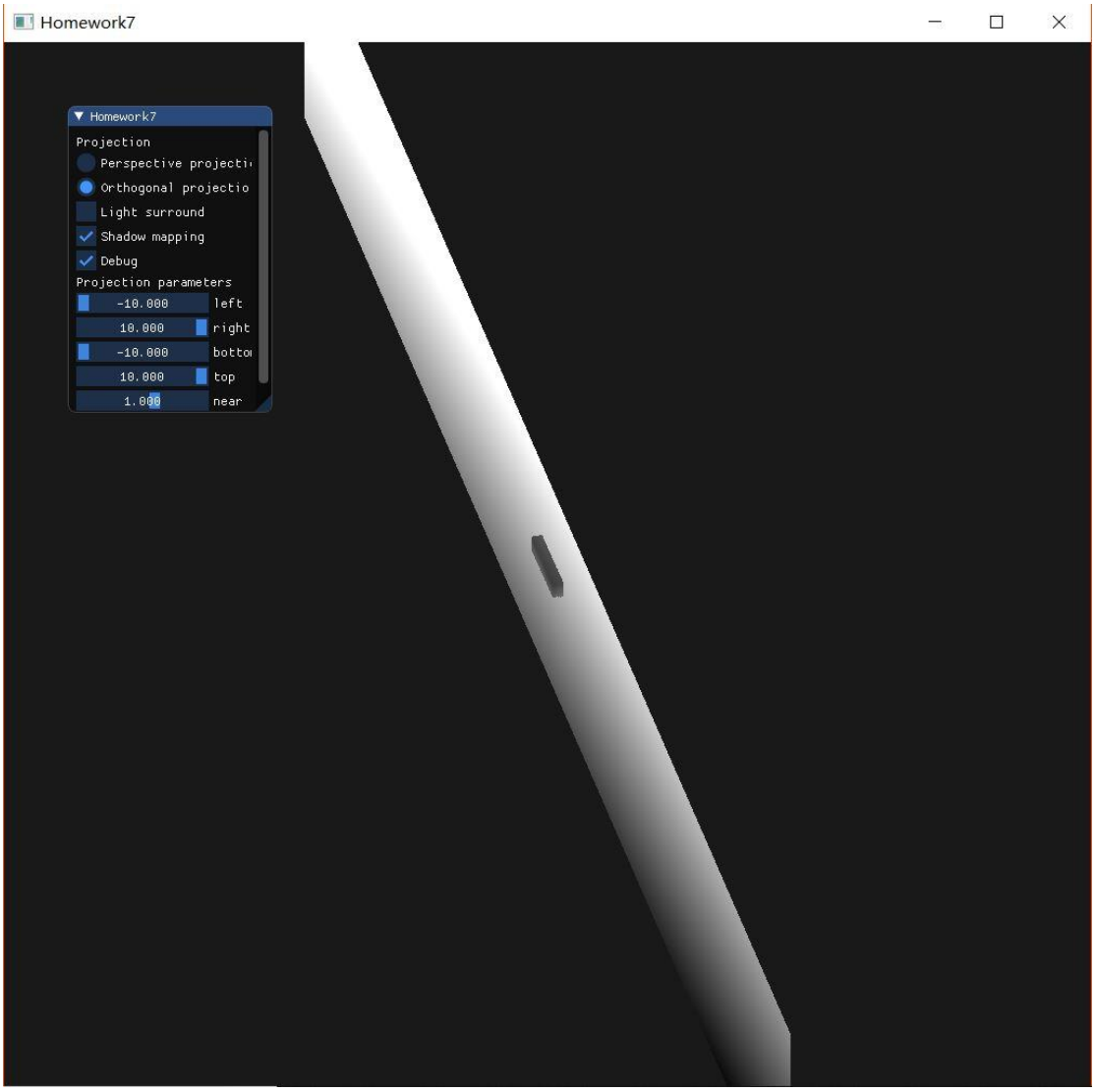
```
int projMode = 0;
bool shadow = true;

bool debug = false;
const int PERSPECTIVE = 0;
const int ORTHOGONAL = 1;
ImGui::Begin(TITLE);
ImGui::Text("Projection");
ImGui::RadioButton("Perspective projection", &projMode,
PERSPECTIVE);
ImGui::RadioButton("Orthogonal projectio", &projMode,
ORTHOGONAL);

ImGui::Checkbox("Light surround", &isLightSurround);

 ImGui::Checkbox("Shadow mapping", &shadow);
 ImGui::Checkbox("Debug", &debug);

if (projMode == PERSPECTIVE) {
    ImGui::Text("Projection parameters");
    ImGui::SliderFloat("radian", &radian, 1, 89);
    ImGui::SliderFloat("near", &nearValue, -5, 5);
    ImGui::SliderFloat("far", &farValue, 5, 150);
    isOrthogonal = false;
 }
 else if (projMode == ORTHOGONAL) {
    ImGui::Text("Projection parameters");
    ImGui::SliderFloat("left", &left, -10, 10);
    ImGui::SliderFloat("right", &right, -10, 10);
    ImGui::SliderFloat("bottom", &bottom, -10, 10);
    ImGui::SliderFloat("top", &top, -10, 10);
    ImGui::SliderFloat("near", &nearPlane, -5, 5);
    ImGui::SliderFloat("far", &farPlane, 5, 150);
    isPerspective = false;
}

 ImGui::End();

glm::mat4 lightProjection, lightView;
glm::mat4 lightSpaceMatrix;
//GLfloat nearPlane = 1.0f, farPlane = 7.5f;
if (projMode == ORTHOGONAL) {
```

```
    lightProjection = glm::ortho(left, right, bottom, top,
    nearPlane, farPlane);
}
 else {
    lightProjection = glm::perspective(radian, (float)display_w /
    (float)display_h, nearValue, farValue);
 }
    lightView = glm::lookAt(lightPos, glm::vec3(0.0f),
    glm::vec3(0.0, 1.0, 0.0));
    lightSpaceMatrix = lightProjection * lightView;
```

透视投影：



此外，还实现了在**光源位置观察**渲染的深度贴图，将深度信息转化为**颜色的深浅**展示，**GUI** 中选择 **Debug** 即可在光源位置看深度缓冲的信息：



选择 **Light surround** 选项可以使**光源**在**椭圆**上移动，看到**实时阴影**的**渲染效果**。具体效果在**视频**中展示。